



CIENCIA DEL SUELO

FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN TRIGO DE LA REGIÓN SUBHÚMEDA: EFICIENCIA DEL USO DEL AGUA Y NITRÓGENOJUAN MANUEL MARTÍNEZ^{1-3*}; JUAN ALBERTO GALANTINI²; MARÍA ROSA LANDRISCINI¹; FERNANDO M. LÓPEZ¹ & MATÍAS E. DUVAL¹

Recibido: 05-08-15

Recibido con revisiones: 21-12-15

Aceptado: 28-12-15

RESUMEN

El agua y el nitrógeno (N) son típicamente los principales factores de producción del trigo en regiones con limitantes hídricas. Por esto, es de gran importancia incrementar la eficiencia de uso del N (EUN) - cuando se aplican fertilizantes - y la eficiencia del uso del agua (EUA) en ambientes subhúmedos. Los objetivos de este trabajo fueron i) analizar la respuesta del trigo a diferentes dosis de N, ii) evaluar la EUN y EUA de la biomasa total aérea (MST) y rendimiento en grano, y iii) predecir estas eficiencias mediante modelos construidos a partir de componentes principales (CP) que expliquen la variabilidad en la producción de MST y rendimiento, durante cinco años en un ambiente subhúmedo. Durante 2008-2012, se realizaron ensayos de fertilización nitrogenada sobre trigo utilizando cuatro dosis (0-25-50-100 kg ha⁻¹) aplicadas a la siembra. En madurez fisiológica se midió la MST y el rendimiento de grano, y se calculó la EUN y EUA para ambos parámetros. El análisis de CP se realizó utilizando al N disponible y humedad del suelo, y las diferentes precipitaciones en función de la MST y rendimiento. Se originaron tres CP para cada parámetro, con una explicación total de la varianza de 90% y 96% para MST y rendimiento. Las predicciones de EUN para MST y rendimiento, incorporaron los 3 CP con elevados valores de predicción ($R^2=0,78-0,81$). Sin embargo, los ajustes fueron bajos ($R^2=0,38-0,45$) para la EUA de MST y grano, excluyendo del modelo al CP influenciado por N disponible. Con alta variabilidad en la disponibilidad de agua la fertilización con N no permitió el incremento significativo de la EUA, demostrando que el factor agua es el más limitante para este ambiente. La utilización de CP como regresoras permitió generar modelos certeros de predicción de la EUN de MST y del rendimiento.

Palabras clave. *Triticum aestivum* L.; Precipitaciones erráticas; Componentes principales.

NITROGEN FERTILIZATION IN WHEAT IN THE SUBHUMID REGION: NITROGEN AND WATER USE EFFICIENCIES**ABSTRACT**

Water and nitrogen (N) are typically the main wheat crop production factors in regions with water constraints. For this reason, it is of great importance to increase the N use efficiency (EUN) -when applying fertilizers- and the water use efficiency (EUA) in sub-humid environments. The objectives of this study were i) to analyze wheat response to different N rates, ii) to evaluate the EUN and EUA of total aboveground biomass (MST) and grain yield, and iii) to predict these efficiencies with models using principal components (CP) related to MST and grain yield as variables for five years in a sub-humid environment. During the 2008-2012 years, nitrogen fertilization trials were conducted in wheat using four rates (0-25-50-100 kg ha⁻¹) applied at sowing. At physiological maturity, MST and grain yield were measured, and EUN and EUA were calculated for both parameters. The CP analysis was performed using available N and soil moisture at planting, and rainfall in function of MST and grain yield. Three CP were made for each parameter, with a full explanation of 90% and 96% of the MST and grain yield total variance. The NUE predictions used three CP with a high fit ($R^2 = 0.78 - 0.81$) for MST and grain yield. However, the EUA predictions of MST and yield were low ($R^2 = 0.38$ to 0.45), excluding from the model the CP highly influenced by the available N. The high variability in water availability did not allow a significant increase in the EUA by N application, showing that water is the most limiting factor in this environment. The use of CP as regressor variables allowed accurate models for EUN prediction of MST and grain yield.

Key words. *Triticum aestivum* L.; Erratic rainfalls; Principal components.

1 Cerzos, Conicet-Universidad Nacional del Sur

2 Comisión de Investigaciones Científicas

3 Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur

*Autor de contacto: jmmartinez@criba.edu.ar

INTRODUCCIÓN

El trigo es uno de los principales cultivos de la Argentina y es la base de los sistemas productivos en una amplia región del sudoeste bonaerense (SOB) (Martínez *et al.*, 2015a). El rendimiento está influenciado por las condiciones climáticas y las propiedades edáficas, siendo el agua y el nitrógeno (N) los dos primeros factores de la producción de los cultivos en regiones con limitantes climáticas (Li *et al.*, 2009). Esta condición se acentúa en el SOB, debido a que la principal característica que define a esta región es la escasez y erraticidad de las precipitaciones (Martínez *et al.*, 2015b). Las aplicaciones deficientes de N producen ingresos menores y llevan a la sobreexplotación de los recursos, mientras que las aplicaciones excesivas aumentan los riesgos de pérdida de nutrientes (St. Luce *et al.*, 2011; Guo *et al.*, 2012). Por esta razón, es de gran importancia lograr incrementar la eficiencia de uso del N proveniente de la aplicación de fertilizantes, a pesar de la variabilidad de las condiciones climáticas (Galantini *et al.*, 2000; Martínez *et al.*, 2015b). La eficiencia en el uso del N (EUN) expresa los kg de grano o kg de biomasa total aérea (MST) por kg de N inorgánico disponible en el suelo (Ladha *et al.*, 2005; Fageria & Baligar, 2005; Barbieri *et al.*, 2008). Esta eficiencia puede incrementarse con la aplicación de fertilizantes, la optimización en el uso del N inorgánico y todas las prácticas de manejo que maximicen la absorción de N por el cultivo (Ladha *et al.*, 2005).

Por su parte, bajo estas condiciones de secano también es de gran importancia maximizar el uso del agua de las precipitaciones por parte de los cultivos. Sadras & Rodríguez (2007) reportaron la importancia de la cantidad y distribución de las precipitaciones sobre el rendimiento del trigo y sobre la eficiencia en el uso del agua (EUA). La EUA de un cultivo puede ser definida en distintas escalas, sin embargo, en condiciones de secano se la define como el rendimiento o producción de biomasa por unidad de agua consumida (Micucci & Alvarez, 2002). Diferentes autores (Passioura, 2002; Sadras & Rodget, 2004; Sadras, 2005) hallaron relaciones positivas entre la adecuada nutrición de los cultivos y la EUA, atribuido a una mejora en el crecimiento y en el rendimiento del cultivo. Por su parte, Caviglia & Sadras (2001) reportaron que la deficiencia de N puede reducir la evapotranspiración reduciendo la EUA. En cambio, Abbate *et al.* (1994) informaron que las limitaciones en la disponibilidad hídrica crean una fuente adicional de variación en la EUA.

Debido a que en este ambiente subhúmedo, la producción del cultivo está relacionada con las variables descriptas

anteriormente (disponibilidad de N y oferta hídrica), es necesario llevar a cabo una evaluación mediante métodos estadísticos que consideren todas estas variables simultáneamente y la correlación entre ellas (Bredja *et al.*, 2000). El análisis multivariado de componentes principales (ACP) construye nuevas variables o ejes artificiales no correlacionadas entre sí -denominados componentes principales (CP) - basándose en la matriz de correlación y con propiedades óptimas para la interpretación de la variabilidad y covariabilidad subyacente (Balzarini *et al.*, 2008).

En estos ambientes la principal característica que define la respuesta a la aplicación de N es la variación interanual de las precipitaciones (Taylor *et al.*, 1978). Diferentes autores (Tilling *et al.*, 2007; Landriscini *et al.*, 2015; Martínez *et al.*, 2015b) han reportado diferentes respuestas a la fertilización nitrogenada según la disponibilidad de agua y la distribución de las precipitaciones. Teniendo en cuenta que gran parte de las precipitaciones en esta región tienen lugar durante el período de barbecho y en su mayor parte no es utilizada por los cultivos (Quiroga *et al.*, 2003), resulta esencial tener en cuenta las interacciones entre la fertilización nitrogenada, la oferta hídrica y la producción del cultivo que permitan incrementar la eficiencia en las aplicaciones de N y el uso del agua. Es por esto, que la hipótesis planteada es que en esta región con erraticidad en las precipitaciones, la aplicación de fertilizantes nitrogenados incrementa la EUN y la EUA, dado por el aumento en la producción de biomasa total y el rendimiento del trigo. Los objetivos fueron i) analizar la respuesta del trigo a diferentes dosis de N, ii) evaluar la eficiencia de uso del N y del agua, y iii) predecir estas eficiencias mediante modelos construidos a partir de componentes principales (ACP) que expliquen la biomasa total aérea (MST) y el rendimiento en grano, durante cinco años en un ambiente subhúmedo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio Experimental

Se realizaron 5 ensayos de fertilización nitrogenada con trigo, durante los años 2008-2012, en lotes con más de 10 años bajo siembra directa, ubicados en la región subhúmeda del SOB. Los mismos se llevaron a cabo en los establecimientos: Las Ruinas (37°58'12,0"S; 62°09'16,7"O), La Casilda (38°19'25,4"S; 61°44'21,4"O) y Hogar Funke (38°10'15,6"S; 62°01'50,1"O) ubicados en los partidos de Cnel. Dorrego, Saldungaray y Tornquist, respectivamente. Los lotes seleccionados poseían un horizonte petrocálcico (tosca), por debajo del metro de profundidad efectiva y por ello, no constituyeron una limitante para

el desarrollo del cultivo. Para asegurar la suficiencia de fósforo (P) en el suelo, se aplicó una dosis promedio de 15–20 kg P ha⁻¹, como superfosfato triple (granulado, 0–46–0, grado equivalente) durante la siembra en todos los lotes. Los cultivos antecesores fueron trigo para los años 2008, 2009, 2010 y 2012, y girasol (*Helianthus annuus* L.) para 2011.

Se utilizaron parcelas de 9 m de largo por 4 m de ancho (36 m²) dispuestas en tres bloques completos aleatorizados. Los tratamientos fueron 4 dosis de N (0, 25, 50, 100 kg N ha⁻¹), aplicados al voleo a la siembra del trigo, en forma de urea (46–0–0). Las variedades de trigo utilizadas fueron tres: *P. Baguette 11*, *Buck Poncho* y *ACA 303*. Las fechas de siembra oscilaron entre principios a mediados de julio y la de cosecha durante la primera quincena de diciembre.

Análisis químicos y físicos

Al momento del establecimiento de los ensayos se tomaron muestras de suelo a las profundidades 0–20 y 20–60 cm para caracterizar cada sitio experimental. En las muestras de suelo de 0–20 cm secadas al aire y tamizadas por tamiz de 2 mm, se determinaron las siguientes propiedades químicas: carbono (C) orgánico, por combustión seca (1500°C) con analizador automático Leco C analyser (Leco Corporation, St Joseph, MI), nitrógeno total (Nt) por el método semimicro-Kjeldahl (Bremner, 1996), fósforo extraíble (Pe) (Bray & Kurtz I, 1945), y pH (relación suelo-agua 1: 2,5). Luego, se estimó el valor de materia orgánica (MO) considerando que un 58% de la misma es C, es decir, utilizando un factor 1,72.

Se tomaron muestras de suelos a la siembra y a la cosecha para determinar el contenido de N-NO₃⁻ en el perfil de suelo en las profundidades de 0–20 y 20–60 cm. Los datos obtenidos en mg kg⁻¹ fueron convertidos a kg ha⁻¹ utilizando un valor de densidad aparente promedio de 1,3 Mg m⁻³ determinado en estudios previos en la zona de estudio (Galantini, comunicación personal). La clasificación taxonómica de los suelos y los datos analíticos se resumen en la Tabla 1.

En madurez fisiológica del trigo (Z90, Zadocks *et al.*, 1974) se recolectó el material vegetal para la determinación de la biomasa total aérea y del rendimiento de grano. En 2009, debido a la severa sequía se restringió el llenado del grano, y sólo se recolectaron muestras de MST en Z90.

Eficiencias del uso del nitrógeno y del agua

Para evaluar las eficiencias del uso del N utilizando definiciones de diferentes autores (Ladha *et al.*, 2005; Fageria & Baligar, 2005; Barbieri *et al.*, 2008), se plantearon las siguientes etapas:

Eficiencia del uso del N (EUN), donde se consideró la cantidad de N disponible para la producción de MST y rendimiento en grano.

$$EUN_{MST} (\text{kg MST kg}^{-1} \text{ de N}) = \text{MST/N disponible}$$

$$EUN_g (\text{kg grano kg}^{-1} \text{ de N}) = \text{grano/N disponible}$$

N, nitrógeno; MST, producción de biomasa total aérea en Z90 (grano y paja en kg ha⁻¹); g, rendimiento en grano con 13% de humedad (kg ha⁻¹); N disponible, N inorgánico hasta 60 cm + N fertilizante (kg ha⁻¹).

El cálculo de la EUA se realizó según Sinclair *et al.* (1984) y Martínez *et al.* (2014), utilizando la MST o grano y el ingreso de agua en el sistema.

Eficiencia en el uso del agua (EUA) para la producción de MST y de grano

$$EUA_{MST} (\text{kg MST mm}^{-1} \text{ agua}) = \text{MST}/((\text{HI} + \text{Pp}) - \text{HF})$$

$$EUA_g (\text{kg grano mm}^{-1} \text{ agua}) = \text{grano}/((\text{HI} + \text{Pp}) - \text{HF})$$

HI, humedad a la siembra en 0–60 cm en forma de lámina de agua (mm); Pp., lluvias registradas durante el ciclo del cultivo (mm); HF, humedad a cosecha en 0–60 cm en forma de lámina de agua (mm); MST, producción de biomasa total aérea a cosecha (grano + paja en kg ha⁻¹); g, rendimiento en grano con 13% de humedad (kg ha⁻¹).

Tabla 1. Características químicas del suelo (0–20 cm) y N inorgánico (0–60 cm) a la siembra del trigo para todos los años.
Table 1. Soil chemical properties (0–20 cm) and inorganic N (0–60 cm) at wheat sowing for all years.

Sitio	año	Clasificación de los suelos	Ni	MO	Nt	Pe	pH
			(kg ha ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	
Las Ruinas	2008	Argiudol Típico	40	37	1,6	28	6,4
Las Ruinas	2009	Argiudol Típico	78	36	1,5	28	6,7
Hogar Funke	2010	Argiudol Típico	35	25	0,9	20	7,0
Hogar Funke	2011	Argiudol Típico	46	39	1,4	14	6,4
La Casilda	2012	Argiustol Típico	48	26	1,3	16	6,4

Ni, nitrógeno inorgánico como N-NO₃; MO, materia orgánica; Nt, nitrógeno total; Pe, fósforo extraíble.

Ni, Inorganic nitrogen as nitrates form; MO, soil organic matter; Nt, soil organic N; Pe, Extractable phosphorus.

Se asumió la misma necesidad teórica de agua del trigo para todos los años, de acuerdo a lo calculado por Paoloni & Vázquez (1985) que realizaron su estudio en la zona de influencia de este trabajo. Estos autores estimaron la necesidad a partir de la evapotranspiración potencial del trigo obtenida mediante la fórmula de Blaney & Criddle, adaptada por la Food and Agriculture Organization (FAO).

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los datos, se realizó ANOVA con dos factores (dosis de N y año) y comparación de medias por DMS de Fisher ($p < 0,05$). Cuando se detectó interacción dosis x año, se realizó un ANOVA simple para cada uno de los años. Se realizaron correlaciones de Pearson entre MST y rendimiento con las siguientes variables: precipitación al barbecho (Pp. barbecho); precipitación de Setiembre (Pp. Set.); Octubre (Pp. Oct.); Noviembre (Pp. Nov.); primavera (Pp. primavera) y precipitaciones del ciclo de cultivo (CC); N disponible ($N-NO_3 + N$ fertilizante) en 0-60 cm y humedad volumétrica inicial (mm) al momento de la siembra del cultivo en 0-60 cm. Para evitar el sesgo cognitivo del análisis de las relaciones lineales entre variables, se realizó el análisis de componentes principales (CP). Se utilizaron las mismas variables analizadas en las correlaciones de Pearson, estandarizadas según la matriz de correlación utilizando a la producción de MST y al rendimiento en grano como variables de clasificación. Sin embargo, debido a la sequía extrema durante 2009, el rendimiento en grano de este año no se incluyó en el análisis multivariado. Este análisis trata de encontrar, con pérdida mínima de información, un nuevo conjunto de variables -denominados CP- no correlacionadas que expliquen la estructura de variación de los datos (Balzarini *et al.*, 2008). Se seleccionaron todos los CP con autovalores > 1

(Sharma, 1996) y dentro de cada uno se seleccionaron los valores más elevados de los autovectores, que indican la importancia de cada una de estas variables en el componente formado (Ferrerías *et al.*, 2014; Toledo *et al.*, 2014). Además de la selección de variables con los mayores autovectores en cada CP, se seleccionaron también aquellas en las cuales la distancia con respecto al mayor autovector era hasta un 10% (Li *et al.*, 2013).

A partir de estos CP generados tanto para MST como para rendimiento en grano, se realizaron regresiones múltiples con el modelo Stepwise con p-valor de entrada y salida de 0,05, utilizando esos CP como variables regresoras para la predicción de la EUN y EUA para ambos parámetros. El objetivo de este análisis fue observar si las mismas variables que permiten explicar la mayoría de la variabilidad en MST y rendimiento en grano, permiten predecir de igual manera la EUN y EUA. La realización de regresiones múltiples (RM) con los CP, permite obtener predicciones más simples y sin redundancia de información basándose en la matriz de correlación de los datos (Nyiraneza *et al.* 2009; Landriscini *et al.*, 2015). Para todos los análisis estadísticos se utilizó el software informático INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2013).

RESULTADOS y DISCUSIÓN

Condiciones climáticas

En el año 2008, las precipitaciones se caracterizaron por presentar períodos de sequía con respecto a la media histórica durante los meses de invierno y el período de llenado de grano del cultivo (mediados de octubre y noviembre) (Fig.1). Las precipitaciones primaverales (setiem-

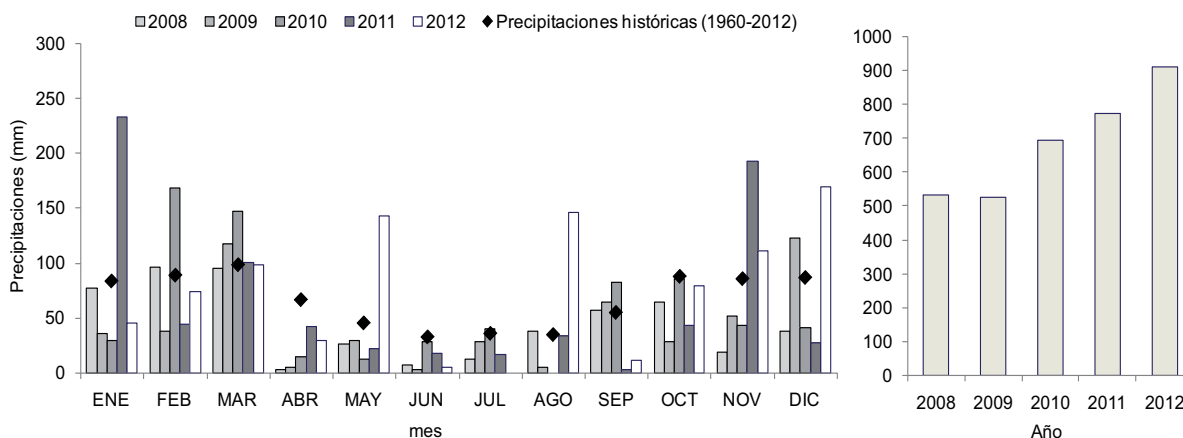


Figura 1. Precipitaciones mensuales (2008-2012), media histórica (1960-2012) en los sitios experimentales y precipitaciones anuales (mm).

Figure 1. Monthly (2008-2012), historic rainfall (1960-2012) for experimental sites and annual rainfalls.

bre, octubre) igualaron a la oferta histórica de agua. En 2009, se observó una sequía generalizada durante la gran mayoría de los meses, en donde las precipitaciones se hallaron por debajo de la oferta hídrica histórica media. En 2010 se repitió lo observado en 2008, mientras que en el año 2011 no se registraron precipitaciones en setiembre y octubre, aumentando de manera considerable en el mes de noviembre, coincidente con el llenado de granos. En 2012 se observaron déficits muy marcados en setiembre y menores en octubre, y en noviembre las precipitaciones estuvieron por encima a la oferta hídrica histórica.

El balance hídrico teórico realizado para el trigo (Tabla 2), indicó que en todos los años estudiados, se produjeron precipitaciones en exceso durante los meses de barbecho (marzo-julio), mientras que de forma casi generalizada,

hubo déficits hídricos en los diferentes estadios fenológicos del trigo. Solamente en 2011, se observó una tendencia diferente en la cual se detectaron excesos hídricos durante el estadio de llenado de grano. En 2012 también se detectaron excesos de agua durante el periodo siembra-macollaje.

Producción del cultivo

Se detectaron interacciones significativas ($p < 0,05$) entre la dosis de N aplicada y el año para MST y rendimiento, por lo que se evaluaron estos parámetros anualmente. Para la producción de MST en los años 2008, 2011 y 2012, se observaron tendencias muy similares en las respuestas al N disponible (Fig. 2a). Para estos tres años se observaron retornos decrecientes, es decir, menores incrementos con

Tabla 2. Balances hídricos teóricos según estadio del cultivo para los años 2008-2012. Signos positivos (+) indican mayor oferta hídrica con respecto a la necesidad del cultivo, mientras signos negativos (-) indican lo contrario. Valores en paréntesis indican déficit o excesos de agua.

Table 2. Theoretical water balances according the water availability and the theory crop requirement for all years. Positive signs (+) indicate higher water supply regarding the theory water requirement, while negative (-) signs indicate otherwise. Values in parenthesis indicate water deficit or excess.

Año	Estadios Fenológicos del trigo			
	Barbecho	Siembra-macollaje	Macollaje-floración	Llenado de grano
2008	+(64mm)	-(2mm)	-(54mm)	-(128mm)
2009	+(87mm)	-(19mm)	-(84mm)	-(95mm)
2010	+(137mm)	-(11mm)	-(7mm)	-(104mm)
2011	+(116mm)	-(1mm)	-(130mm)	+(46mm)
2012	+(208mm)	+(94mm)	-(85mm)	-(36mm)

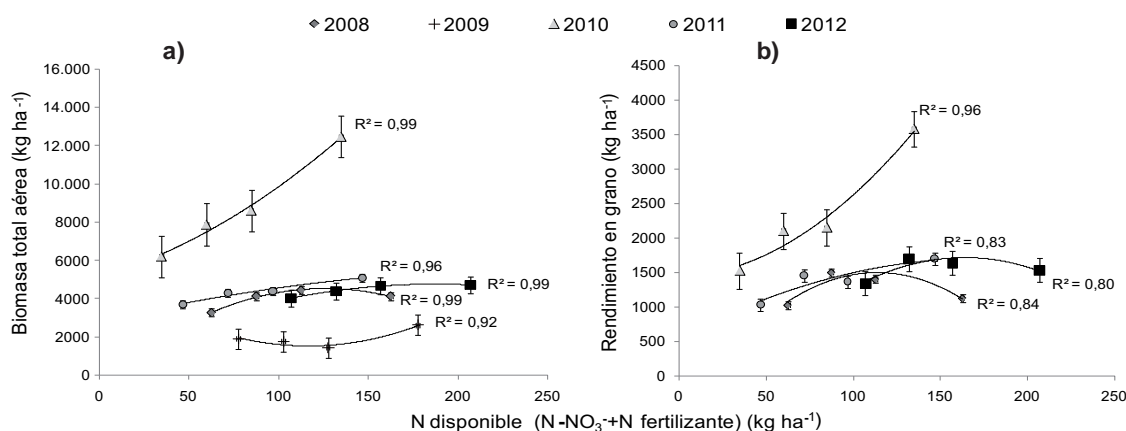


Figura 2. Producción de a) Biomasa total aérea (MST) y b) rendimiento de grano (media \pm error estándar) en función del N disponible ($N-NO_3^- + N$ fertilizante) en el suelo para cada año estudiado (2008-2012).

Figure 2. a) Total aerial dry matter and b) grain yields (mean \pm standard error) by available N ($N-NO_3^- + N$ fertilizer) for each year (2008-2012).

el aumento del N disponible, hallándose para todos la mayor producción de MST con la dosis de 50 kg N ha⁻¹ que correspondió a diferentes niveles de N disponible según el año. Con respecto al año 2010, la respuesta al N disponible fue creciente sin llegar al rendimiento máximo. La condición del suelo con bajos contenidos de N-NO₃ a la siembra sumado al bajo déficit de agua en el periodo de floración (Tabla 2) favoreció esta respuesta. Contrastando estos resultados, en 2009 se detectó una respuesta inversa a los demás años, valores de MST por debajo en comparación a los otros años. Además, se detectó un mínimo en la producción de MST con la dosis de 50 kg N ha⁻¹. Teniendo en cuenta las dosis empleadas, se hallaron diferencias significativas ($p < 0,05$) para MST en 2008, 2010 y 2011. Para estos tres años se obtuvieron la máxima producción de MST con 100 kg N ha⁻¹.

El rendimiento en grano demostró respuestas más marcadas al N disponible muy similares a las halladas para MST (Fig. 2b). Esta relación es coincidente a la hallada por Martínez *et al.* (2014) quienes hallaron similares respuestas entre MST y el rendimiento en grano para suelos de la zona de influencia de este estudio. Sin embargo, en ambientes con limitaciones en la oferta hídrica durante los estadios avanzados del cultivo de trigo, usualmente no se observan estas tendencias de respuesta similares entre MST y rendimiento (McDonald, 1989; Martínez *et al.*, 2015a). En este caso, se hallaron diferencias significativas en las dosis aplicadas para 2008, 2010 y 2011. Sin embargo, en 2008 el máximo rendimiento se halló con la dosis de 25 kg N ha⁻¹, mientras que en 2010 y 2011 fue con la dosis de 100 kg N ha⁻¹.

Eficiencias en el uso del N y del agua

En todos los años estudiados, la EUN en la producción tanto de MST como de grano disminuyó con el incremento de la dosis de N aplicada (Fig. 3), coincidente con lo hallado por otros autores (López-Bellido *et al.*, 2008; Barbieri *et al.*, 2008; Martínez *et al.*, 2014). Respecto a la EUN_{MST}, se observó interacción significativa entre la dosis de N aplicada y el año, por lo que se evaluó anualmente. Caso contrario se observó en la EUN_g; ya que no se halló interacción significativa ($p > 0,05$) entre año y dosis de N. Esta diferencia entre EUN_{MST} y EUN_g estuvo dada por el efecto climático adverso sobre los estadios más avanzados del cultivo (Tabla 2) que afectaron los rendimientos de trigo. Estos déficits hídricos en estadios avanzados del cultivo, acortan el periodo de llenado de grano, ya que estas lluvias son fundamentales para la translocación de los fotoasimilados

(Galantini *et al.*, 2000; Martínez *et al.*, 2015b), y la absorción y uso eficiente del N del suelo (Albrizio *et al.*, 2010). Los valores de EUN_{MST} fueron diferentes según los años, siendo 2010 > 2011 > 2008 > 2012 > 2009 (Fig. 3). Esta diferencia entre años se debió a la variabilidad marcada en las precipitaciones (Fig. 1), ya que la cantidad de N inorgánico en el suelo a la siembra fue similar para la mayoría de los años, a excepción del 2009, donde además, se registró una fuerte sequía.

Con respecto a los valores obtenidos para la EUN_g, la mayoría fueron inferiores al rango de EUN de 19 hasta 32 kg grano por kg de N disponible citado por López-Bellido *et al.* (2005), para una región mediterránea con características climáticas similares a las de este estudio. Estos valores fueron inferiores a los reportados en la bibliografía, debido al menor rendimiento de grano en comparación a ese estudio. Sin embargo, en 2010 las eficiencias halladas superaron esos valores debido a que fue el año con los mayores rendimientos favorecido por menores déficits hídricos desde el periodo siembra-floración del cultivo.

La EUN_{MST} no presentó interacción significativa ($p > 0,05$) entre año y dosis en todos los años (Fig. 4), mientras que la EUN_g presentó interacción significativa ($p < 0,05$) entre las dosis de N y el año. Los valores de EUN_{MST} se ubicaron entre 12,1 y 18,5 kg mm⁻¹, obteniéndose la máxima eficiencia con la dosis de 100 kg N ha⁻¹ ($p < 0,05$). Anualmente, los valores de EUN_{MST} fueron diferentes, siendo 2010 > 2008 > 2011 = 2012 = 2009. En este caso, las diferencias anuales fueron dadas por los déficits hídricos registrados en el periodo macollaje-floración (Tabla 2) y la producción de biomasa aérea. Esto demuestra cómo influyen las precipitaciones y su variación durante el ciclo del cultivo sobre la fertilización nitrogenada en la EUN_{MST}.

La EUN_g osciló entre 2,7 y 10,5 kg g mm⁻¹ de agua, encontrándose en casi todos los años entre 6,5 y 10,9 kg grano mm⁻¹ de agua, comparando suelos de la región de estudio reportados por Krüger *et al.* (2014). Para cada año, las mayores EUN_g no se obtuvieron con la mayor dosis de N aplicada (100 kg N ha⁻¹), sucediendo solamente en 2010, mientras que en 2008 la mayor EUN_g se obtuvo con 25 kg N ha⁻¹. En 2011, se observó una gran variabilidad en la EUN_g y en 2012 no se hallaron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre las dosis. Estas diferencias entre años con respecto a la EUN_g demostró cómo influye la variabilidad de las precipitaciones sobre esta eficiencia, debido a que la EUN_g se comportó igual en todos los años (interacción no significativa ($p > 0,05$) entre dosis y año).

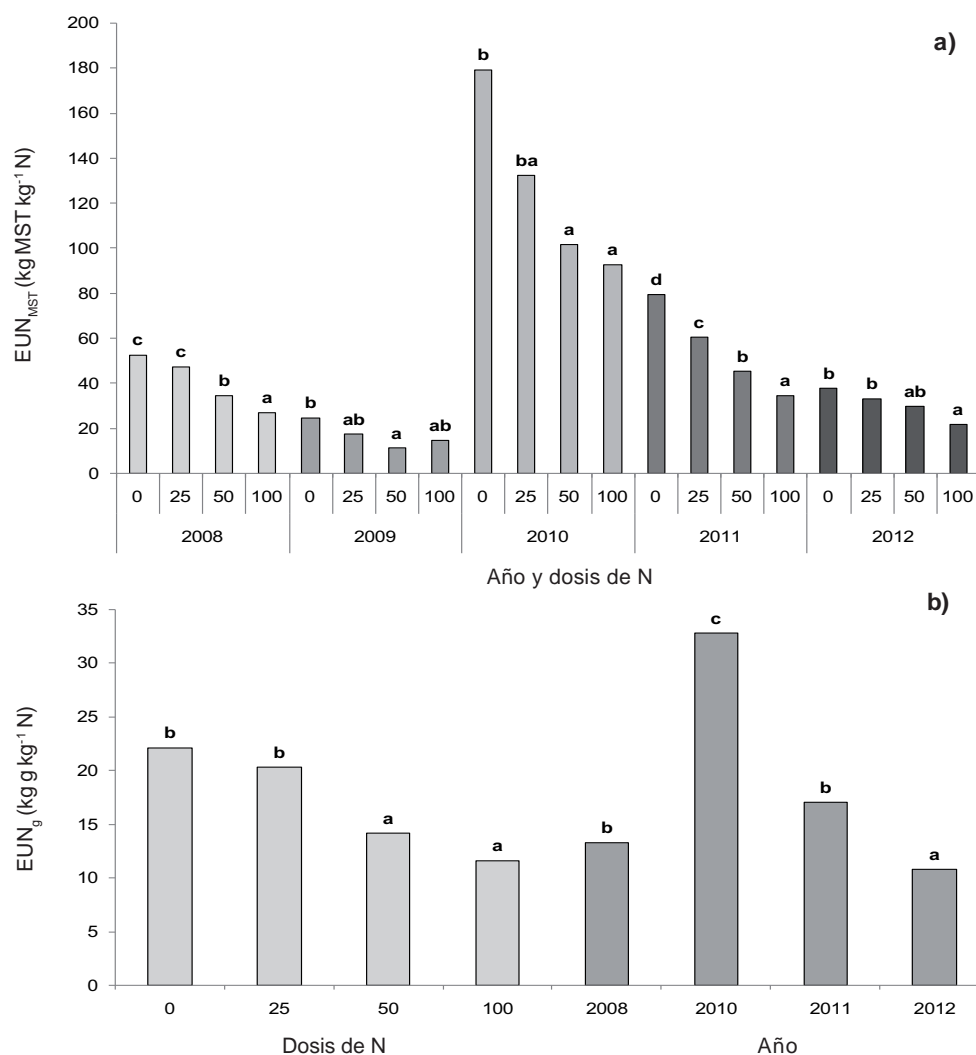


Figura 3. Eficiencias media del uso del nitrógeno (EUN) en a) MST y b) grano según dosis de N para todos los años.
Figure 3. Nitrogen use efficiency (EUN) in a) MST and b) grain yield by N rate for all years.

Relación de la MST y grano con las lluvias, el N disponible y la humedad del suelo

Las correlaciones de Pearson para MST y rendimiento de grano mostraron escaso ajuste (Tabla 3). Con respecto a MST, se hallaron relaciones altamente significativas ($p < 0,001$) con la humedad del suelo y con Pp. Oct. Además se hallaron correlaciones significativas ($p < 0,01$) con Pp. barbecho y Pp. primavera. En el caso del rendimiento en grano, se halló una relación altamente significativa ($p < 0,001$) con humedad del suelo a la siembra del cultivo y correlaciones significativas ($p < 0,01$) con Pp. Set., Pp. Oct y Pp. barbecho. Estas correlaciones de la MST y rendimiento en grano con las Pp. Oct.

coinciden con lo obtenido por Martínez *et al.* (2015b), quienes encontraron valores similares en un ambiente semiárido del SOB.

Análisis de componentes principales con variables climáticas y edáficas para la predicción del rendimiento de MST y grano

Debido a que mediante el análisis de correlaciones de Pearson no se lograron obtener relaciones con elevados ajustes de MST y rendimiento con las variables estudiadas (Tabla 4), se procedió a realizar un análisis multivariado de CP. Debido a que se utilizó a MST y al rendimiento de grano

Tabla 3. Correlaciones de Pearson entre MST y rendimiento en grano con las precipitaciones, N disponible y humedad del suelo.

Table 3. Pearson's correlations between MST and grain yield with different rainfalls, available N and soil moisture.

Parametro	Coeficientes de correlación (r)							
	N disponible	Humedad	Pp. barbecho	Pp. Set.	Pp. Oct.	Pp. Nov.	Pp. primavera	Pp. CC
MST	-0,05	<i>0,70</i>	<i>0,42</i>	0,28	<i>0,67</i>	-0,09	<i>0,46</i>	0,24
rendimiento	0,16	<i>0,58</i>	<i>0,36</i>	<i>0,43</i>	<i>0,46</i>	-0,20	0,22	-0,02

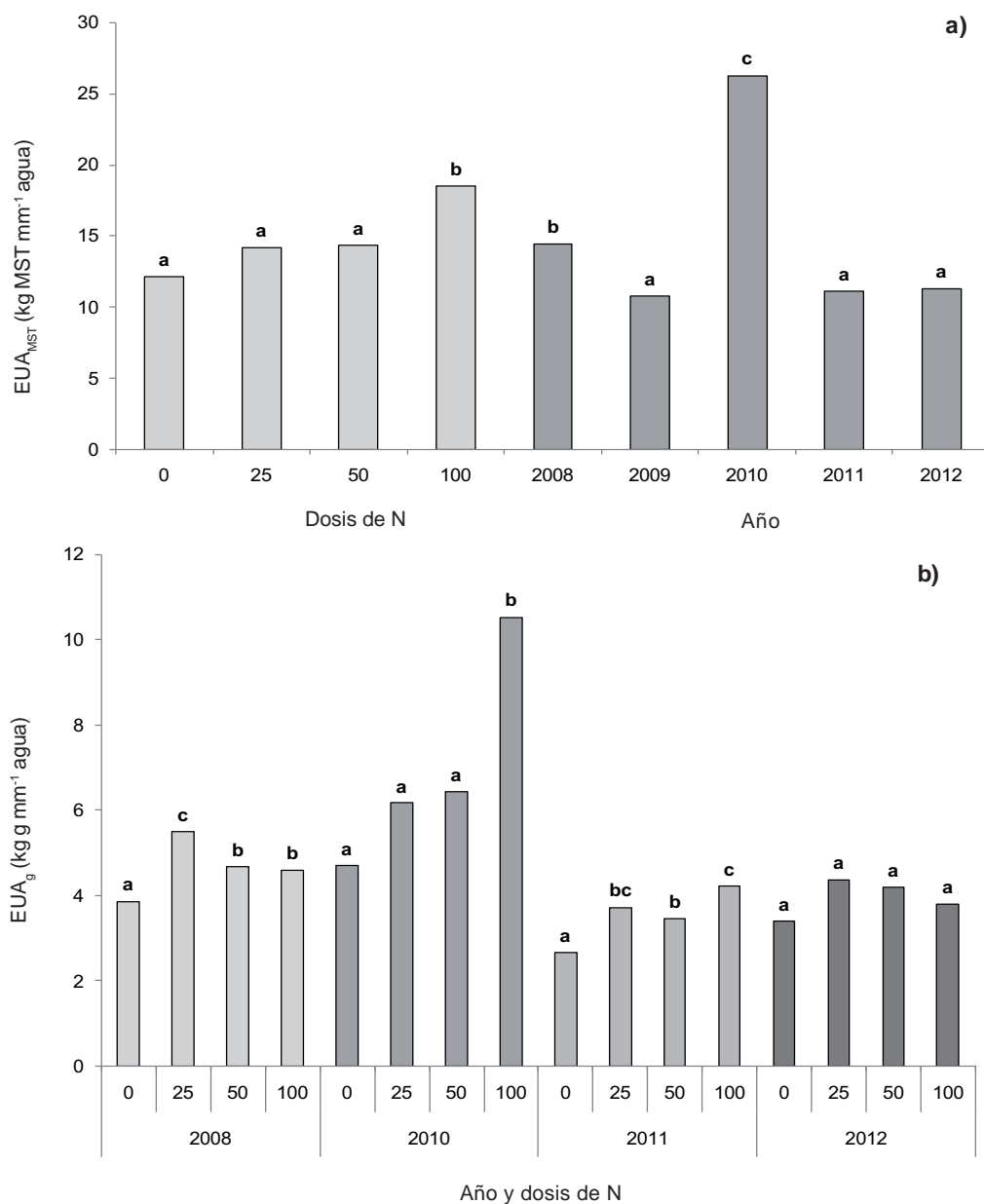
En negrita y cursiva se indican las correlaciones significativas ($p < 0,01$).In bold and italic are indicate the significant correlations ($p < 0.01$).

Figura 4. Eficiencia del uso del agua (EUA) en a) MST y b) grano según dosis de N para los años 2008-2012.

Figure 4. Water use efficiency (EUA) in a) MST and b) grain yield by N rate for 2008-2012 years.

como variables de clasificación, se obtuvieron diferentes resultados según el parámetro evaluado. Se obtuvieron tres CP con autovalores > 1 con todas las variables utilizadas (Tabla 4). La explicación total de la varianza fue del 94% y 98% para MST y grano, respectivamente. Es por esto que en el caso de MST, las variables más importantes fueron Pp. primavera ($CP1_{MST}$); Pp. Oct. ($CP2_{MST}$) y $N-NO_3$ ($CP3_{MST}$). Para el caso del rendimiento en grano las variables más importantes dentro de cada CP fueron: Pp. Nov. y Pp. Set. ($CP1_g$), Pp. barbecho ($CP2_g$) y el $N-NO_3$ ($CP3_g$) (Tabla 4). Estos resultados hallados en el ACP, contrastan en parte los obtenidos por las correlaciones, debido a que este análisis permite la interdependencia de variables, donde pueden visualizarse tanto tratamientos como variables, a fin de estudiar la asociación existente entre ellas (Landriscini *et al.*, 2015). Las principales diferencias entre los CP que explican la MST y el rendimiento en grano fueron dadas por las precipitaciones de final de ciclo del trigo. La MST está muy relacionada con las precipitaciones de primavera, mientras que para el rendimiento en grano se observó una relación positiva con Pp. Nov. y negativa con Pp. Set. Estos resultados demuestran la importancia de las precipitaciones

durante el período de llenado del grano sobre el rendimiento del cultivo (Martínez *et al.*, 2015a). Además, la relación negativa con Pp. Set. se debió a que éstas favorecen una mayor producción de MST, sin embargo, sin una adecuada provisión de agua en los estadios avanzados del cultivo donde los requerimientos son mayores, se afectaría el rendimiento en grano (McDonald, 1992). Otros autores (Landriscini *et al.*, 2015; Martínez *et al.*, 2015b) han informado sobre la importancia de las precipitaciones durante el periodo de llenado del grano para el trigo en un ambiente semiárido del SOB.

Los resultados obtenidos demuestran que el agua (oferta hídrica) es el principal factor -por sobre el N- de producción tanto de biomasa aérea como de rendimiento de grano para este ambiente subhúmedo. Esto es coincidente a lo hallado por otros autores (Oweis *et al.*, 2000; Martínez *et al.*, 2015a y b), quienes concluyeron que en condiciones de secano el agua es el principal factor de producción en trigo en regiones semiáridas y subhúmedas.

Tabla 4. Componentes principales (CP) para biomasa total aérea (MST) y rendimiento de grano para todos los años.
Table 4. Principal components (CP) for total aerial dry matter (MST) and grain yield for all years.

	MST (n=60)			Rendimiento de grano (n=48)		
	$CP1_{MST}$	$CP2_{MST}$	$CP3_{MST}$	$CP1_g$	$CP2_g$	$CP3_g$
Autovalores	3,79	2,32	1,13	3,89	2,62	1,2
Proporción de Varianza	0,47	0,29	0,14	0,49	0,33	0,15
Varianza acumulada	0,47	0,76	0,90	0,49	0,81	0,96
Variables	Autovectores			Autovectores		
N disponible	0,03	-0,10	0,91	0,09	0,15	0,83
Humedad	0,29	0,49	-0,06	-0,33	0,46	-0,13
Pp. barbecho	0,39	0,20	0,17	0,13	0,59	-0,03
Pp. Set	-0,33	0,43	-0,11	-0,47	0,05	-0,23
Pp. Oct.	0,21	0,58	0,11	-0,33	0,46	0,09
Pp. Nov.	0,38	-0,43	-0,16	0,50	0,01	-0,15
Pp. primavera	0,46	-0,03	-0,28	0,36	0,26	-0,45
Pp. CC	0,40	-0,04	0,11	0,39	0,37	0,10

En negrita y cursiva, se encuentran seleccionadas las variables que más influyeron en cada CP originado. N disponible, N inorgánico en forma de nitratos ($kg\ ha^{-1}$) en 0-60 cm + N aplicado por fertilizante ($kg\ ha^{-1}$) al momento de la siembra del trigo ($kg\ ha^{-1}$); Humedad, humedad volumétrica inicial (mm) en 0-60 cm; Pp., precipitaciones (mm); Pp. barbecho, precipitaciones de Marzo- Julio; Pp. Primavera, precipitaciones de Setiembre + Octubre + Noviembre; Pp. CC., precipitaciones del ciclo del cultivo.

In bold and italic are the most important variables on each CP. Available N, inorganic N as nitrates form ($kg\ ha^{-1}$) plus N from fertilizer ($kg\ ha^{-1}$) at wheat seeding; HI, soil moisture (mm) at wheat seeding at 0-60 cm; Pp., Rainfalls (mm); Pp. barbecho, March-July rainfalls; Pp. Primavera., September + October + November rainfalls; Pp. CC., Crop growth cycle rainfalls.

Predicción de las EUN y EUA con los CP

Las RM de predicción para las EUN y EUA para MST y grano obtenidas fueron diferentes. Se obtuvieron ecuaciones con elevados valores de predicción ($R^2=0,78-0,81$) de la EUN, utilizando los 3 CP generados para MST y grano (Tabla 5). Sin embargo, para la EUA de MST y grano, los ajustes hallados fueron bajos ($R^2=0,34-0,46$) eliminando las variables del CP3, que estaba altamente influenciado por el N disponible. Esto demuestra que los CP que explican en gran medida la variabilidad total de la MST y el rendimiento en grano están altamente relacionados con la EUN, sin embargo, para EUA, el modelo Stepwise seleccionó aquellos más relacionados con las variables climáticas excluyendo al CP que estaba altamente explicado por el N disponible. Estos resultados permiten concluir que en este ambiente la EUA no está relacionada con todas las variables relacionadas con MST y rendimiento, refutando la hipótesis planteada.

El uso de los CP permite mejorar la fiabilidad de la predicción (Li *et al.*, 2013), debido a la existencia de multicolinealidad en las RM con muchas variables correlacionadas entre sí, -como es el caso de las diferentes precipitaciones evaluadas- generando información redundante (Bowerman & O'Connell, 1990).

Esto confirma que debido a la erraticidad de las precipitaciones la aplicación de N por fertilizantes podría incre-

mentar la producción de MST y rendimiento en grano, sin embargo, no incrementaría de manera significativa la EUA.

CONCLUSIONES

Se observaron respuestas diferentes en la producción de MST y rendimiento en grano a la aplicación de N, dado por la erraticidad de las precipitaciones a lo largo de los años.

La EUN y EUA mostró variabilidad debido a que la principal limitante de la producción fue la oferta hídrica proveniente de las precipitaciones. Con alta variabilidad en la disponibilidad de agua la aplicación de N no permitió el incremento significativo de la EUA, demostrando que el factor agua es el mayor limitante para este ambiente.

El uso de CP en RM permitió generar modelos de predicción certeros de la EUN, a partir de las nuevas variables originadas que estaban altamente relacionadas con la MST y el rendimiento en grano.

Este estudio presenta información sobre los efectos de la fertilización nitrogenada sobre la EUN y EUA del trigo en un ambiente con limitantes climáticas. Sin embargo, para estudios futuros es necesario tener en consideración un mayor número de variables edáficas y climáticas que permitan mejorar la explicación de estas eficiencias, especialmente la EUA.

Tabla 5. Regresiones múltiples de predicción de la EUN y EUA utilizando como variables regresoras a los CP que explican la MST y el rendimiento en grano.

Table 5. Multiple regressions predicting EUN and EUA prediction using CP that explain MST and grain yield as regressor variables.

Parámetro	Variable dependiente	<i>n</i>	Variables regresoras	Parámetro estimado	Error estándar	p-valor	R ²	R ² ajustado
MST	EUN	60	constante	56,9	2,7	<0,0001	0,79	0,78
			CP1 _{MST}	5,9	1,4	0,0001		
			CP2 _{MST}	18,3	1,8	<0,0001		
			CP3 _{MST}	-23,1	2,4	<0,0001		
	EUA		constante	15,0	0,7	<0,0001	0,47	0,46
			CP2 _{MST}	3,4	0,5	<0,0001		
rendimiento	EUN	48	constante	18,5	0,7	<0,0001	0,82	0,81
			CP1 _g	-1,9	0,3	<0,0001		
			CP2 _g	1,6	0,4	0,0003		
			CP3 _g	-7,6	0,6	<0,0001		
	EUA		constante	4,8	0,2	<0,0001	0,37	0,34
			CP1 _g	-0,5	0,1	0,0001		
			CP2 _g	0,3	0,1	0,0151		

BIBLIOGRAFÍA

- Abbate, PE; FH Andrade & JP Culot. 1994. Determinación del rendimiento en trigo. Estación Experimental Agropecuaria INTA Balcarce. Boletín Técnico N° 133. 20 pp.
- Albrizio, R; M Todorovic; T Matich & AM Stellacci. 2010. Comparing the interactive effects of water and nitrogen on durum wheat and barley grown in a Mediterranean environment. *Field Crops Res.* 115: 179-190.
- Balzarini, MG; L González; M Tablada; F Casanoves; JA Di Rienzo & CW Robledo. 2008. Infostat. Manual del Usuario, Editorial Brujas, Córdoba, Argentina.
- Barbieri, PA; H Sainz Rozas & HE Echeverría. 2008. Time of nitrogen application affects nitrogen use efficiency of wheat in the humid pampas of Argentina. *Can. J. Plant Sci.* 88: 849-857.
- Bowerman, BL & RT O'Connell. 1990. Linear statistical models: An applied approach. Editorial Duxbury Press, Belmont, Ca.
- Bray, R & L Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. *Soil Sci.* 59: 39-45.
- Bredja, JJ; TB Moorman; DL Karlen & TH Dao. 2000. Identification of regional soil quality factors and indicators: I. Central and southern high plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 2115-2124.
- Bremner, JM. 1996. Nitrogen total. In: Methods of soil analysis. Part 3: Chemical Methods; Sparks, DL (ed). Pp. 1085-1123. SSSA. Madison, WI.
- Caviglia, OP & VO Sadras. 2001. Effect of nitrogen supply on crop conductance, water and radiation use efficiency of wheat. *Field Crops Res.* 69:259-266.
- Di Rienzo, JA; F Casanoves; MG Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & CW Robledo. 2013. InfoStat versión 2013. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Fageria, NK & VC Baligar. 2005. Enhancing Nitrogen Use Efficiency in Crop Plants. *Adv. Agron.* 88: 97-185.
- Ferreras, LA; MC Ferrari; GC Magra; FE Solá Brignone & LA Rivoltella. 2014. Evaluación de la calidad del suelo bajo distintos sistemas de cultivo. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y II Reunión de Materia Orgánica y Sustancias Húmicas. Bahía Blanca, Argentina.
- Galantini, JA; MR Landriscini; JO Iglesias; AM Miglierina & RA Rosell. 2000. The effects of crop rotation and fertilization on wheat productivity in the Pampean semiarid region of Argentina 2. Nutrient balance, yield and grain quality. *Soil Till. Res.* 53: 137-144.
- Guo, S; H Zhu; T Dang; J Wu; W Liu; M Hao; Y Li & JK Syers. Winter wheat grain yield associated with precipitation distribution under long-term nitrogen fertilization in the semiarid Loess Plateau in China. *Geoderma* 190: 442-450.
- Krüger H; F Frolla & J Zilio. 2014. Trigo en zonas marginales. Precipitaciones, retención en el suelo y EUA. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca, Argentina.
- Ladha, JK; H Pathak; TJ Krupnik; J Six & C Van Kessel. 2005. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. *Adv. Agron.* 87: 85-165.
- Landriscini, MR; JM Martínez & JA Galantini. 2015. Fertilización foliar con nitrógeno en trigo en el sudoeste bonaerense. *Ci. Suelo* 33(2): en prensa.
- Li, SX; ZH Wang; SS Malhi; SQ Li; YJ Gao & XH Tian. 2009. Nutrient and water management effects on crop production, and nutrient and water use efficiency in dryland areas of China. *Adv. Agron.* 102: 223-265.
- Li, P; T Zhang; X Wang & D Yu. 2013. Development of biological soil quality indicator system for subtropical China. *Soil Till. Res.* 126: 112-118.
- López-Bellido, L; RJ López-Bellido & R Redondo. 2005. Nitrogen efficiency in wheat under rainfed Mediterranean conditions as affected by split nitrogen application. *Field Crops Res.* 94: 86-97.
- López-Bellido, RJ; JE Castillo & L López-Bellido. 2008. Comparative response of bread and durum wheat cultivars to nitrogen fertilizer in a rainfed Mediterranean environment: soil nitrate and N uptake and efficiency. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 80: 121-130.
- Martínez, JM; MR Landriscini & JA Galantini. 2014. Eficiencia del uso del nitrógeno y del agua para trigo en suelos del Sudoeste Bonaerense. *En: Ciencia y experiencia para una siembra directa sustentable en los ambientes frágiles del S y SO Bonaerense*; Galantini, JA (ed). Pp. 27-33. Aapresid, Rosario.
- Martínez, JM; JA Galantini & MR Landriscini. 2015a. Diagnóstico de fertilidad nitrogenada en el sudoeste bonaerense mediante el uso de un clorofilómetro en trigo. *Ci. Suelo* 33: 31-44.
- Martínez, JM; JA Galantini & MR Landriscini. 2015b. Eficiencia en el uso del nitrógeno del trigo en la región semiárida de Buenos Aires (Argentina): efectos de las dosis y momento de aplicación. *Agriscientia* 32: 15-27.
- McDonald, GK. 1989. The contribution of nitrogen fertilizer to the nitrogen nutrition of rainfed wheat crops in Australia: a review. *Anim. Prod. Sci.* 29: 455-481.
- McDonald, GK. 1992. Effects of nitrogenous fertilizer on the growth, grain yield and grain protein concentration of wheat. *Aust J. Agric. Res.* 43: 949-967.
- Micucci, F & C Álvarez. 2002. Impacto de las prácticas de manejo sobre la eficiencia de uso del agua en los cultivos extensivos de la región pampeana Argentina. *Inpofo Archivo Agronómico* 6:1-4.
- Nyiraneza, J; MH Chantigny; AN' Dayegamiye & MR Laverdière. 2009. Variations in Corn Yield and Nitrogen Uptake in Relation to Soil Attributes and Nitrogen Availability Indices. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 317-327.
- Oweis, T; H Zhang & M Pala. 2000. Water use efficiency of rainfed and irrigated bread wheat in a Mediterranean environment. *Agron. J.* 92(2): 231-238.
- Paoloni, JD & R Vázquez. 1985. Necesidades teóricas de los cereales de invierno y probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones como base para el balance hídrico. *An. Edafol. Agrobiol.* XLIV: 1545-1556.
- Passioura, JB. 2002. Environmental biology and crop improvement. *Funct. Plant Biol.* 29: 537-546.
- Quiroga, A; D Funaro & O Ormeño. 2003. Aspectos del manejo del agua del suelo para el cultivo de trigo. Trigo actualización 2003. INTA Anguil, Boletín Técnico 76: 33-44.
- Sadras, VO. 2005. A quantitative top-down view of interactions between stresses: theory and analysis of nitrogen-water co-limitation in Mediterranean agro-ecosystems. *Aust. J. Agric. Res.* 56: 1151-1157.

- Sadras, VO & D Rodriguez. 2007. The limit to wheat water use efficiency in eastern Australia. II. Influence of rainfall patterns. *Aust. J. Agric. Res.* 58: 657-669.
- Sadras, VO & D Roget. 2004. Production and environmental aspects of cropping intensification in a semiarid environment of southeastern Australia. *Agron. J.* 96: 236-246.
- Sharma, S. 1996. *Applied Multivariate Techniques*. Editorial John Wiley and Sons, Nueva York.
- Sinclair, TR; CB Tanner & JM Bennet. 1984. Water-use efficiency in crop production. *BioSci.* 34: 36-40.
- St. Luce, M; JK Whalen; N Ziadi & BJ Zebarth. 2011. Nitrogen dynamics and indices to predict soil nitrogen supply in humid temperate soils. *Adv. Agron.* 112: 55-102.
- Taylor, AC; RR Storrier & AR Gilmour. 1978. Nitrogen needs of wheat. 2. Grain yield response to nitrogenous fertilizer. *Aust. J. Exp. Agric. Anim. Husb.* 18: 18-20.
- Tilling, AK; GJ O'Leary; JG Ferwerda; SD Jones; GJ Fitzgerald; D Rodriguez & R Belford. 2007. Remote sensing of nitrogen and water stress in wheat. *Field Crops Res.* 104: 77-85.
- Toledo, DM; SM Contreras Leiva; DF Fernández & S Vázquez. 2014. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y II Reunión de Materia Orgánica y Sustancias Húmicas. Bahía Blanca, Argentina. 5 al 9 de mayo de 2014.
- Zadoks, JC; TT Chang & CF Konzak. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res.* 14: 415-421.